DOI:10.11931/guihaia.gxzw201903019

桂北不同林龄桉树人工林土壤微生物数量和酶活性特征研究

段春燕[1,2,5]，何成新[2,5]，沈育伊[3]，滕秋梅[2]，徐广平[2,5*]，罗亚进[4]，

周龙武[2]，顾大形[2]，何文[2]，黄科朝[2]

（1. 广西师范大学 珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室，广西 桂林 541006；2. 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所，广西 桂林 541006；3. 广西植物功能物质研究与利用重点实验室，广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所，广西 桂林 541006；4. 广西雅长兰科植物国家级自然保护区管理局，广西 百色 533209；5. 广西师范大学 生命科学学院，广西 桂林 541006）

摘 要：为探讨桉树不同林龄土壤微生物活性的响应特征，采用时空互代法，选择广西北部低山丘陵地区1~5 a 生桉树人工林为研究对象，分析了土壤微生物、酶活性在不同土层和季节的变化规律。结果表明：(1)土壤微生物和酶活性在土层中有明显的垂直分布特征，均随土层加深而趋于降低，且各土层间差异显著。(2)细菌、放线菌数量随季节的大小顺序为秋季>夏季>春季>冬季，真菌的变化规律为春季>夏季>秋季>冬季，而酶活性随季节变化表现为夏、秋季活性较高，春、冬季活性较低。(3)细菌、真菌、脲酶、过氧化氢酶随林龄增大表现出先减小后增大的趋势，放线菌则呈现先减小后增大再减小的趋势，而蔗糖酶、酸性磷酸酶随林龄的增大趋于增大。(4)林地土壤中三大类群微生物与四种土壤酶之间存在极显著正相关关系，说明土壤微生物与土壤酶活性相互影响，两者之间关系密切，共同影响土壤的质量。不同土层土壤微生物和酶活性的季节响应特征差异较大，总体在冬季最低，主要与气温、水分条件、凋落物养分的归还等影响有关。不同季节、土层、林龄之间的交互作用对土壤微生物和酶活性有显著影响。

关键词：桉树人工林，土壤微生物，土壤酶活性，林龄，季节

中图分类号：S714.5　　　　**文献标识码：**A

Study on soil microbe quantity and enzyme activity characteristics in *Eucalyptus* plantations of different ages at North Guangxi

DUAN Chunyan[1,2,5], HE Chengxin[2,5], SHEN Yuyi[3], TENG Qiumei[2], XU Guangping[2,5]*, LUO Yajin[4], ZHOU Longwu[2], GU Daxing[2], HE Wen[2], HUANG Kechao[2]

(1. *Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection*(*Guangxi Normal University*), *Ministry of Education*, Guilin 541006, Guangxi, China; 2. *Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain*, *Guangxi Institute of Botany*, *Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin

---

基金项目：国家自然科学基金(31760162，41361057)；广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金(17-259-23)；广西自然科学基金(2018GXNSFAA050069，2017GXNSFBA198037)；广西科技攻关计划(桂科攻 1598016-12)；广西科技重大专项(桂科 AA18118011-4，桂科 AB18126065)；广西植物研究所基本业务费项目(17012，18007，18015)；广西百色高新技术产业开发区引导项目(K-YS-SW-201801) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31760162, 41361057); the Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain(17-259-23); the Natural Science Foundation of Guangxi(2018GXNSFAA050069, 2017GXNSFBA198037); the Science and Technology Program of Guangxi(1598016-12); Science and Technology Major Project of Guangxi(AA18118011-4, AB18126065); the Fundamental Research Fund of Guangxi Institute of Botany(17102, 18007, 18015); the Pilot-projekt of Guangxi Baise High-tech Industrial Development Zone(K-YS-SW-201801)]。

作者简介：段春燕(1992-)，女，山西吕梁人，硕士研究生，主要从事森林生态学研究，(E-mail) duancysx@163.com。

***通信作者：**徐广平，博士，副研究员，主要从事土壤生态学与全球变化的研究，(E-mail) xugpgau@163.com。

541006, Guangxi, China; 3. *Guangxi Key Laboratory of Functional Phytochemicals Research and Utilization*, *Guangxi Institute of Botany*, *Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences*, Guilin 541006, Guangxi, China; 4. *Administration Bureau of Yachang Orchid National Nature Reserve*, Baise 533209, Guangxi, China; 5. *College of Life Sciences*, *Guangxi Normal University*, Guilin 541006, Guangxi, China）

Abstract: To study the characteristics of soil microbial activity under different age of *Eucalyptus*, using the space-time intergenerational method, we studied the variations characteristics of soil microbes and enzyme activities from four soil depths (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm and 30-40 cm) under different forest ages of *Eucalyptus* plantations (1 a, 2 a, 3 a, 4 a and 5 a) in the hilly areas at northwest Guangxi. The results were as follows: (1) In the soil layers, soil microbial and enzyme activities had obvious vertical distribution characteristics. The microbial content and enzyme activities both decreased with the deepening of the soil layer, significantly among the soil layers. (2) The order of bacteria and actinomycetes contents were autumn>summer>spring>winter, the variation tendency of fungi was spring>summer>autumn>winter, and the enzyme activity changed with season differently, which was higher in summer and autumn , and lower in spring and winter. (3) The soil bacteria, fungi, urease and catalase in the *Eucalyptus* plantation showed a trend of decreasing firstly and then increasing with the increase of forest ages, and actinomycetes decreased, increased and then decreased. The activities of invertase and acid phosphatase all increased with the increase of forest ages. (4) There was a significant correlation between the soil microbes and the soil enzymes, indicating that the interaction between soil microbes and soil enzymes had a close relationship, which all affected the quality of the soil.The seasonal changes of soil microorganism and enzyme activities were different in soil layers, which was the lowest in the winter and was mainly related to temperature, water condition and nutrient return of litter and so on.The interactions between different seasons, soil layers and forest ages had a significant effects on soil microbial and enzyme activities.

Key words: *Eucalyptus* plantations, microorganism, enzyme activity, forest age, season

桉树（*Eucalyptus*）是桃金娘科桉属植物的总称，其适应性强，用途广泛，是我国南方许多地区（海南、广东、广西、福建等）重要的速生丰产林树种。近年来，广西桉树人工林的发展速度及面积都名列全国第一（黄国勤和赵其国，2014）。目前，桉树高强度的种植管理模式，提高了木材的生产量，为我国木材基地做出了重要贡献（Arnold et al.，2013；李超，2015）。但是，为推动桉树产业的快速发展从而缩短桉树轮伐期或提高桉树生长速度等不合理的种植方式不断出现，由此引发的一些生态问题也日益突出，如土壤质量退化（韦建宏等，2017），生物多样性减少等（温远光等，2005；黄国勤和赵其国，2014；Liu & Li，2010；Liang et al.，2016）。土壤质量退化主要表现为土壤肥力下降等，尤其会改变土壤养分特征、土壤微生物及土壤酶等。而土壤微生物和酶对土壤环境改变的响应较有机质和其它养分更为敏感，微小的变化会改变土壤微生物群落的结构和活性（朱利霞，2018）。因此，研究桉树人工林土壤微生物数量及酶活性的变化对桉树人工林的可持续发展具有重要的意义。

土壤微生物既是土壤中生物地球化学循环和能量流动的重要参与者，也是森林生态系统不可缺少的分解者，其影响着土壤生态系统的物质养分能量循环（李超等，2017；宋贤冲等，2017）。土壤酶主要参与各种生物化学过程和物质循环，其活性变化也是评价土壤质量的重要指标（曾小龙，2009；杨远彪等，2008；徐广平等，2014）。我国桉树人工林面积已超过 450 万 hm^2，广西桉树人工林的面积约占全国桉树种植面积的二分之一（张健军等，2012）。桂北低山丘陵地区桉树人工林多为集体和个人承包，施肥、农药除草剂等高强度、粗放型管理的现象普遍存在，部分林分在 3～4 a 龄即开始采伐。不同林龄下，桉树人工林土壤微生物数量和酶活性的季节变化动态特征尚不清楚，尤其在 1~5 a 生间隔较短但桉树生长变化又快的这一段时期内，不同林龄下土壤微生物数量和酶活性的季节变化特征是什么？鉴于此，通过时空互代法，选择广西北部黄冕林场 1~5 a 生不同林龄的桉树人工林为研究对象，以邻近马尾松林（*Pinus massoniana*，10 a）为对照，探讨不同林龄桉树土壤微生物数量特征、土壤酶活性的季节变化以及它们之间的相关性，以期为桉树人工林的高效经营管理与提质增效提供科学参考。

1 研究区概况

研究区选择在广西黄冕林场，地处柳州市鹿寨县与桂林市永福县交界区域，109°43′46″—109°58′18″ E，

24°37′25″—24°52′11″ N，该区域属于中亚热带气候，无霜期长，雨热同期；年均气温为 19 ℃，年平均降雨量为 1 750～2 000 mm，主要集中在 4—8 月，热量充足，年均蒸发量 1 426～1 650 mm。黄冕林场主要为低山和丘陵地貌，地形起伏大，坡面险峻，林地土壤类型主要以砂岩、砂页岩等发育而成的红壤、山地黄红壤为主（段春燕等，2018）。

2 材料与方法

2.1 样地设置和样品的采集

2013 年 4 月（春季）、7 月（夏季）、10 月（秋季）及 2014 年 1 月（冬季），通过野外详细调查，采用时空互代法，选择由本底资料和时间一致的马尾松次生林改种而来的 1 年生、2 年生、3 年生、4 年生和 5 年生不同林龄桉树（巨尾桉，*Eucalyptus urophylla* × *E.grandis*）为研究对象，在土壤母质、海拔、坡向、营林措施等基本接近的不同林班中，各设置 3 块间隔 60~80 m、面积为 20 m×20 m 的样地作为重复。同时，在邻近未被改种为桉树的马尾松林（*Pinus massoniana*，10 a）对照区，设置 3 块 20 m×20 m 的标准样地。在去除地表凋落物后，采用 5 个典型代表性样点取样法采集土壤样品。土壤取样器直径 5 cm；取样间隔 10 cm；土层深度 40 cm，分为 4 层取土，同层土壤混匀为 1 个样品。采集的土壤样品带回实验室后保存于 4 ℃冰箱中备用，土壤鲜样用于微生物数量的分析，风干样用于测定土壤酶活性等。

2.2 土壤微生物数量和酶活性的分析

土壤微生物数量的分析参考许光辉和郑洪元（1986）的稀释平板计数法，详细实验方法见周龙武等（2017）。土壤酶活性选择关松荫（1986）的苯酚钠比色、3,5-二硝基水杨酸比色、磷酸苯二钠比色等方法，详细方法表述见徐广平等（2014）。

2.3 数据处理

通过 Excel 2010 和 SPSS 23.0 进行表的制作和数据处理，采用单因素方差分析（One-way ANOVA）、多因素方差分析（Multi-way ANOVA）和 LSD 多重比较（α=0.05）进行数据统计分析。

3 结果与分析

3.1不同林龄桉树林土壤微生物数量的变化

不同林龄桉树人工林土壤细菌数量表现出一定的垂直分布规律。土壤表层的细菌数量最多，同一季节不同土层细菌数量均随着土层加深逐渐减少（表1）。而随着林龄的增大，细菌数量呈现先降低后升高的趋势；在同一土层同一季节，各林龄桉树细菌数量与对照组马尾松存在显著差异（$P<0.05$），但土层越深，林龄之间差异减小。同一土层不同季节细菌数量的大小顺序为秋季>夏季>春季>冬季；而对照组马尾松林土壤细菌数量大小关系表现为冬季>春季>秋季>夏季，且不同季节之间有显著差异（$P<0.05$）。

同一林龄不同土层，不同桉树人工林与马尾松林土壤放线菌数量整体随土层深度增加而下降（表2）。同一土层同一季节桉树人工林放线菌数量随着林龄的增大呈现先减小后增大再减小的变化趋势，不同林龄之间存在差异性（$P<0.05$）。同一土层同一林龄桉树人工林与马尾松林土壤放线菌数量的季节变化规律一致表现为秋季>夏季>春季>冬季，桉树人工林0~30 cm土层的放线菌数量在不同季节之间差异性显著（$P<0.05$），但在30~40 cm土层中，林龄1~5 a的春季和冬季之间差异不显著（$P>0.05$），3 a和4 a的夏季和秋季、春季和冬季，5 a的四个季节，差异均不显著（$P>0.05$），说明土壤放线菌数量随着土层深度加深差异趋于减小；而在马松林对照组，同一土层不同季节间放线菌数量均有显著差异（$P<0.05$）。

不同林龄桉树人工土壤真菌数量季节变化为春季>夏季>秋季>冬季，而对照组马尾松林则为秋季>夏季>春季>冬季（表3）。对于桉树人工林0~20 cm土层的真菌数量，3 a生的在秋季和冬季之间差异不显著（$P>0.05$），而4 a生的在夏季和秋季之间的差异不显著（$P>0.05$）；对于30~40 cm土层的真菌数量，1~5 a生桉树人工林和对照组马尾松林各自在夏季和秋季间差异不显著（$P>0.05$）。在同一季节，各林龄桉树人工林土壤真菌数量随土层深度加深呈现逐渐减小的分布特征。同一土层不同季节，随着林龄增大，呈现先减小后增大的趋势。

表 1 不同林龄桉树人工林土壤细菌数量的变化

Table 1 Changes of the number of soil bacterial in *Eucalyptus* plantations at different forest ages

(10^6个 g^{-1}DW)

土层 Soil layer (cm)	季节 Season	林龄 Stand age (a)					
		1	2	3	4	5	CK（10）
0~10	春 Spring	11.83±0.24Bd	10.79±0.23Bc	8.32±0.39Aa	7.55±0.34Ba	9.45±0.12Bb	11.08±0.11Ccd
	夏 Summer	13.79±0.23Cf	12.29±0.12Ce	10.92±0.12Bc	8.87±0.22Ca	11.77±0.14Cd	9.43±0.12Bb
	秋 Autumn	16.72±0.31De	14.11±0.12Dd	12.31±0.09Cc	10.03±0.10Db	13.77±0.14Dd	6.91±0.11Aa
	冬 Winter	10.45±0.19Ad	9.21±0.09Ac	8.74±0.24Ac	6.68±0.17Aa	7.41±0.14Ab	13.56±0.18De
10~20	春 Spring	7.23±0.21Bd	6.19±0.17Bc	5.74±0.14Bb	5.21±0.06Ba	6.06±0.05Bbc	9.13±0.06Ce
	夏 Summer	9.71±0.30Ce	9.03±0.08Cd	8.22±0.11Cc	7.52±0.09Cb	8.80±0.14Cd	6.75±0.17Ba
	秋 Autumn	13.60±0.59Dc	11.36±0.20Dc	10.34±0.16Dc	7.90±0.14Db	11.18±0.13Dc	5.26±0.17Aa
	冬 Winter	5.95±0.12Ad	5.44±0.08Ac	5.30±0.08Ac	4.25±0.05Aa	4.72±0.19Ab	11.25±0.07De
20~30	春 Spring	4.63±0.30Babc	3.15±0.07Ab	2.63±0.19Aab	2.20±0.02Aa	2.71±0.24Aab	6.15±0.10Cc
	夏 Summer	5.74±0.16Cd	5.01±0.35Bbc	4.42±0.26Bb	3.34±0.07Ba	5.34±0.14Bcd	4.63±0.26Bbc
	秋 Autumn	8.83±0.10Dc	8.47±0.33Cbc	8.12±0.18Cc	6.08±0.07Cb	8.20±0.08Cc	3.42±0.23Aa
	冬 Winter	3.13±0.08Ac	2.35±0.15Aab	2.46±0.16Ab	2.05±0.05Aa	2.15±0.01Aab	7.87±0.10Dd
30~40	春 Spring	1.55±0.15Ba	1.11±0.03Aa	1.00±0.02Aa	0.93±0.03Aa	1.05±0.05Aa	3.57±0.23Bb
	夏 Summer	2.26±0.14Ccd	2.10±0.06Bbc	2.03±0.08Bbc	1.59±0.22Ba	1.74±0.06Bab	2.51±0.10Ad
	秋 Autumn	4.23±0.14Dd	3.35±0.15Cb	3.06±0.06Cb	2.20±0.03Ca	3.80±0.21Cc	2.21±0.09Aa
	冬 Winter	1.06±0.04Aab	1.00±0.03Aab	0.92±0.003Ab	0.82±0.02Aab	0.89±0.003Aa	4.71±0.17Cc

注：同一列不同大写字母表示同一林龄不同季节间差异显著（*P*<0.05），同一行不同小写字母表示同一季节不同林龄间差异显著（*P*<0.05）。下同

Note: Different uppercase letters in the same column indicate significant differences between different seasons at the same forest ages (*P*<0.05). Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different forest ages in the same season (*P*<0.05). The same below.

表 2 不同林龄桉树人工林土壤放线菌数量的变化

Table 2 Changes of the number of soil actinomycetes in *Eucalyptus* plantations at different forest ages

(10^6个 g^{-1}DW)

土层 Soil layer (cm)	季节 Season	林龄 Stand age (a)					
		1	2	3	4	5	CK（10）
0~10	春 Spring	1.12±0.06Bd	0.94±0.01Bc	0.68±0.01Bb	0.76±0.04Bb	0.43±0.02Aa	1.31±0.01Be
	夏 Summer	1.26±0.02Be	1.16±0.03Cd	0.89±0.02Cb	1.08±0.03Cc	0.51±0.03Ba	1.60±0.02Cf
	秋 Autumn	1.79±0.06Cbd	1.67±0.06Dabd	1.49±0.01Db	1.57±0.01Dbc	1.21±0.01Ca	1.64±0.01Ccd
	冬 Winter	0.89±0.02Ae	0.68±0.02Ad	0.46±0.03Ab	0.53±0.01Ac	0.37±0.02Aa	1.02±0.02Af
10~20	春 Spring	0.69±0.04Bde	0.63±0.05Bcd	0.52±0.03Bb	0.58±0.02Bbc	0.34±0.02Ba	0.78±0.003Be
	夏 Summer	1.17±0.02Cd	0.99±0.02Cc	0.74±0.01Cb	0.77±0.01Cb	0.42±0.02Ca	0.95±0.003Cc
	秋 Autumn	1.39±0.04Dd	1.22±0.03Dc	1.05±0.04Db	1.14±0.009Dbc	0.93±0.01Da	1.14±0.04Cbc
	冬 Winter	0.53±0.03Ac	0.41±0.01Ab	0.40±0.02Ab	0.43±0.01Ab	0.24±0.009Aa	0.58±0.02Ac
20~30	春 Spring	0.45±0.007Bcd	0.39±0.03Bbc	0.35±0.01Bb	0.38±0.02Bb	0.22±0.006Ba	0.46±0.02Bd
	夏 Summer	0.89±0.02Ce	0.82±0.02Cd	0.66±0.03Cc	0.69±0.009Cc	0.31±0.01Ca	0.59±0.01Cb
	秋 Autumn	1.15±0.04Db	1.06±0.04Dab	0.88±0.006Db	0.95±0.01Db	0.76±0.009Da	0.85±0.009Db
	冬 Winter	0.32±0.02Acd	0.26±0.03Abc	0.21±0.02Ab	0.24±0.02Ab	0.13±0.006Aa	0.35±0.02Ad
30~40	春 Spring	0.23±0.01Ac	0.20±0.02Abc	0.16±0.02Aab	0.16±0.03Aab	0.11±0.01Aa	0.23±0.01Bc
	夏 Summer	0.51±0.01Bd	0.39±0.01Bc	0.36±0.007Bbc	0.35±0.02Bb	0.20±0.02Aa	0.34±0.006Cb
	秋 Autumn	0.77±0.05Cc	0.53±0.05Cb	0.41±0.03Bab	0.40±0.07Bab	0.25±0.06Aa	0.45±0.02Db

冬 Winter	0.17±0.02Aac	0.13±0.006Abc	0.13±0.006Abc	0.12±0.009Aab	0.09±0.003Aa	0.17±0.01Aac

表 3 不同林龄桉树人工林土壤真菌数量的变化

Table 3 Changes of the number of soil fungus in *Eucalyptus* plantations at different forest ages

(10^6个 g^{-1}DW)

土层 Soil layer (cm)	季节 Season	林龄 Stand age (a)					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**CK（10）**
0~10	春 Spring	0.68±0.02Dd	0.58±0.02Dc	0.45±0.02Cb	0.34±0.01Ca	0.59±0.02Dc	0.47±0.009Bb
	夏 Summer	0.48±0.02Cc	0.38±0.02Cb	0.26±0.03Ba	0.22±0.009Ba	0.50±0.03Cc	0.59±0.03Cd
	秋 Autumn	0.36±0.02Bc	0.26±0.01Bb	0.16±0.009Aa	0.24±0.01Bb	0.41±0.02Bd	0.90±0.02De
	冬 Winter	0.21±0.01Abc	0.16±0.009Ab	0.12±0.001Aab	0.10±0.007Aa	0.13±0.003Aab	0.27±0.007Ac
10~20	春 Spring	0.51±0.02Dc	0.40±0.03BCb	0.35±0.02Cb	0.28±0.007Ca	0.40±0.01Db	0.37±0.01Bb
	夏 Summer	0.36±0.02Cc	0.30±0.01Cb	0.21±0.02Ba	0.18±0.003Ba	0.34±0.009Cbc	0.49±0.02Cd
	秋 Autumn	0.25±0.006Bcd	0.22±0.006Bbc	0.13±0.007Aa	0.19±0.02Bb	0.28±0.02Bd	0.69±0.02De
	冬 Winter	0.15±0.009Ad	0.13±0.006Ac	0.09±0.01Ab	0.07±0.003Aa	0.09±0.006Ab	0.24±0.006Ae
20~30	春 Spring	0.39±0.02De	0.29±0.01Dbc	0.25±0.01Db	0.21±0.10Ca	0.33±0.007Cd	0.31±0.01Bcd
	夏 Summer	0.24±0.009Cb	0.20±0.007Cb	0.16±0.02Cab	0.12±0.003Ba	0.22±0.006Bb	0.42±0.009Cc
	秋 Autumn	0.18±0.01Bb	0.15±0.007Ba	0.12±0.007Ba	0.13±0.009Ba	0.21±0.01Bb	0.48±0.01Dc
	冬 Winter	0.12±0.006Ac	0.10±0.007Ac	0.07±0.009Ab	0.04±0.003Aa	0.06±0.006Aab	0.19±0.007Ad
30~40	春 Spring	0.22±0.02Cd	0.13±0.003Cbc	0.12±0.003Cab	0.10±0.01ABa	0.16±0.01Bc	0.25±0.01Bd
	夏 Summer	0.14±0.006Bc	0.11±0.009Bab	0.09±0.01BCa	0.09±0.003Ba	0.13±0.006Bbc	0.32±0.02Cd
	秋 Autumn	0.11±0.01ABab	0.11±0.009Bab	0.08±0.009Ba	0.09±0.009ABab	0.13±0.01Bb	0.30±0.02Cc
	冬 Winter	0.08±0.006Ac	0.07±0.007Abc	0.04±0.01Aab	0.03±0.007Aa	0.04±0.009Aa	0.12±0.009Ad

3.2不同林龄桉树林土壤酶活性的变化

桉树人工林与对照组马尾松林，不同土层之间土壤蔗糖酶均有明显的垂直分布特征，表层土的蔗糖酶活性较高，随土层的加深蔗糖酶活性逐渐降低（表4）。同一土层不同林龄桉树人工林土壤蔗糖酶的季节变化表现为秋季>夏季>春季>冬季，各季节之间显著差异（P<0.05）。不同季节同一土层随林龄变化均呈现为对照组（10 a）>5 a>4 a>3 a>2 a>1 a，林龄越大，酶活性与对照组越接近。

同一土层的桉树人工林与马尾松林，各林龄脲酶活性的季节变化趋势为夏季>秋季>春季>冬季，季节之间大部分有差异；同一季节同一个林龄中，脲酶活性均随着土层深度增加而趋于下降（表5）。同一土层同一季节，脲酶活性随林龄的增大而呈现出一定的变化趋势：1~3 a时，酶活性逐渐下降，之后又大幅升高，而对照组马尾松林的脲酶活性要远大于1~5 a桉树人工林。

同一季节同一土层，酸性磷酸酶在不同林龄间的变化无规律性，对照组马尾松林的酸性磷酸酶大于1~4 a，但小于5 a（表6）。同一土层同一林龄土壤酸性磷酸酶活性的季节变化与脲酶相同，表现为夏季>秋季>春季>冬季，各季节之间差异显著（P<0.05）。随土层的加深，酸性磷酸酶活性逐渐降低。

土壤过氧化氢酶活性表层明显高于中下层，且土层越深，活性越低。同一土层同一林龄，过氧化氢酶活性的季节变化为夏季>秋季>春季>冬季（表7）。同一土层，过氧化氢酶活性随林龄先减小后增大，其中2 a的桉树人工林过氧化氢酶活性最低，而马尾松林的过氧化氢酶活性介于桉树人工林4 ~5 a之间，但在一些林龄间差异不显著（P>0.05），如：30~40 cm土层，春季1 ~2 a之间、3 ~4 a之间，秋季、冬季的1~2 a之间。

表 4 不同林龄桉树人工林土壤蔗糖酶活性的变化

Table 4 Changes of soil invertase activity of *Eucalyptus* plantations at different forest ages

(mg$C_6H_6O_6$ g^{-1} 24 h, mg g^{-1})

土层 Soil layer (cm)	季节 Season	林龄 Stand age (a)					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**CK（10）**
0~10	春 Spring	7.79±0.13Ba	10.70±0.32Bb	13.63±0.32Bc	14.45±0.16Bd	17.68±0.20Be	19.08±0.26Bf
	夏 Summer	10.74±0.30Ca	13.82±0.28Cb	18.41±0.34Cc	19.00±0.17Cc	21.03±0.08Cd	25.59±0.47Ce
	秋 Autumn	12.18±0.47Da	15.15±0.11Da	19.74±0.36Db	20.22±0.19Db	23.11±0.09Dc	26.93±0.25Dd
	冬 Winter	5.15±0.16Aa	6.44±0.26Ab	8.72±0.25Ac	10.12±0.13Ad	13.13±0.07Ae	15.36±0.05Af
10~20	春 Spring	5.01±0.08Ba	8.81±0.16Bb	10.74±0.17Bc	11.01±0.12Bc	13.55±0.22Bd	15.17±0.14Be
	夏 Summer	8.56±0.26Ca	11.10±0.11Cb	15.13±0.45Cc	15.81±0.34Cc	17.84±0.30Cd	20.51±0.24Ce
	秋 Autumn	9.29±0.17Da	12.10±0.17Db	15.99±0.11Cc	17.04±0.04Cd	19.20±0.09De	22.14±0.15Df
	冬 Winter	3.35±0.16Aa	5.39±0.17Ab	7.47±0.16Ac	8.21±0.14Ad	9.70±0.21Ae	11.36±0.09Af
20~30	春 Spring	4.20±0.08Ba	5.53±0.27Bb	6.98±0.05Bc	7.04±0.13Bc	10.46±0.13Bd	11.10±0.08Be
	夏 Summer	5.80±0.17Ca	8.15±0.33Cb	11.30±0.38Cc	12.84±0.20Cd	14.44±0.37Ce	17.01±0.39Cf
	秋 Autumn	6.28±0.08Da	9.29±0.19Db	13.63±0.21Dc	13.49±0.04Dc	15.43±0.10Dd	18.00±0.16De
	冬 Winter	2.31±0.09Aa	3.53±0.23Ab	4.21±0.48Ab	5.42±0.12Ac	7.31±0.18Ad	9.27±0.24Ae
30~40	春 Spring	2.32±0.18Ba	3.39±0.13Bb	4.64±0.23Bc	4.94±0.19Bc	7.00±0.10Bd	7.74±0.03Be
	夏 Summer	3.21±0.03Ba	4.74±0.26Cab	7.51±0.26Cc	7.74±0.45Cbcd	10.55±0.39Cde	12.30±0.08Ce
	秋 Autumn	4.28±0.03Ca	5.75±0.14Db	8.44±0.16Dc	8.28±0.19Cc	11.94±0.11Cd	14.06±0.16De
	冬 Winter	1.13±0.15Aa	2.27±0.16Ab	3.31±0.18Ac	3.41±0.09Ac	4.57±0.22Ad	6.01±0.17Ae

表 5 不同林龄桉树人工林土壤脲酶活性的变化

Table 5 Changes of soil urease activity in *Eucalyptus* plantations at different forest ages

(NH_3-N mg g^{-1} ·48 h, mg g^{-1})

土层 Soil layer (cm)	季节 Season	林龄 Stand age (a)					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**CK（10）**
0~10	春 Spring	10.29±0.10Bb	7.76±0.10Ba	7.49±0.13Ba	16.78±0.14Bc	21.62±0.09Bd	30.27±0.20Be
	夏 Summer	18.44±0.85Cb	12.31±0.57Da	11.08±0.67Da	24.14±1.43BCc	30.27±0.88Dd	43.26±0.19De
	秋 Autumn	13.34±0.08Cb	9.54±0.07Ca	9.48±0.20Ca	20.01±0.11Cc	25.18±0.14Cd	36.24±0.20Ce
	冬 Winter	7.60±0.08Ac	4.28±0.04Aa	5.50±0.09Ab	11.17±0.12Ad	14.35±0.21Ae	19.77±0.22Af
10~20	春 Spring	7.52±0.15Bb	4.37±0.14Ba	4.54±0.09Ba	12.46±0.20Bc	16.34±0.18Bd	22.19±0.19Be
	夏 Summer	13.41±0.73Cb	7.75±0.25Da	6.95±0.33Da	19.57±0.75Dc	23.32±0.54Dd	30.41±0.61De
	秋 Autumn	9.24±0.06Cb	4.87±0.10Ca	5.15±0.09Ca	14.20±0.08Cc	21.21±0.17Cd	28.29±0.25Ce
	冬 Winter	5.26±0.07Ac	2.65±0.05Aa	3.29±0.09Ab	8.60±0.18Ad	10.47±0.13Ae	16.64±0.26Af
20~30	春 Spring	5.71±0.17Bc	3.09±0.09Bb	2.39±0.08ABa	6.86±0.15Bd	12.24±0.17Be	14.39±0.08Bf
	夏 Summer	10.84±0.42Cb	4.63±0.23Ca	4.57±0.34BCa	13.77±0.40Dc	16.37±0.82Cd	23.49±0.37De
	秋 Autumn	6.23±0.11Bb	3.42±0.08Ba	3.31±0.07Ca	9.14±0.07Cc	15.27±0.10Cd	17.37±0.18Ce
	冬 Winter	3.75±0.20Ab	2.36±0.09Aa	2.22±0.10Aa	5.24±0.09Ac	8.35±0.16Ad	10.34±0.13Ae
30~40	春 Spring	3.17±0.09Bb	1.86±0.04Ba	1.72±0.08Ba	4.32±0.12Bc	6.49±0.13Bd	8.46±0.16Be
	夏 Summer	6.46±0.35Db	2.98±0.36Ca	2.80±0.23ABCa	7.83±0.40Db	9.97±0.76ABCc	15.25±0.51Dd
	秋 Autumn	3.85±0.11Cb	2.11±0.06Ba	2.26±0.06Ca	6.36±0.14Cc	9.25±0.13Cd	12.42±0.11Ce
	冬 Winter	2.25±0.07Ab	1.15±0.06Aa	1.12±0.03Aa	3.33±0.14Ac	4.87±0.12Ad	6.35±0.11Ae

表 6 不同林龄桉树人工林土壤酸性磷酸酶活性的变化

Table 6 Changes of soil acid phosphatase activity in *Eucalyptus* plantations at different forest ages

(mg 酚 g^{-1} ·24 h, mg g^{-1})

土层 Soil layer (cm)	季节 Season	林龄 Stand age (a)					
		1	2	3	4	5	CK（10）
0~10	春 Spring	11.34±0.13Ba	12.99±0.15Bb	12.56±0.26Bb	15.30±0.19Bc	16.90±0.16Bd	15.36±0.07Bc
	夏 Summer	17.37±0.26Da	21.03±0.89Db	20.00±0.38Db	24.64±0.17Dc	26.21±0.26Dd	25.04±0.12Dcd
	秋 Autumn	15.32±0.07Ca	18.86±0.14Cc	16.52±0.15Cb	20.18±0.07Cd	23.37±0.12Cf	22.40±0.14Ce
	冬 Winter	8.78±0.19Aa	10.41±0.14Ac	9.24±0.06Ab	11.40±0.11Ad	12.80±0.14Af	12.15±0.16Ae
10~20	春 Spring	8.50±0.18Ba	11.24±0.10Bb	8.84±0.12Ba	12.59±0.10Bc	13.16±0.09Bd	12.58±0.25Bc
	夏 Summer	13.72±0.29Da	17.66±0.21Dc	15.82±0.19Db	18.10±0.11Dcd	19.83±0.25De	18.48±0.12Dd
	秋 Autumn	12.25±0.18Ca	12.92±0.50Cab	12.49±0.20Ca	15.22±0.18Cb	16.44±0.08Cb	17.46±0.11Cc
	冬 Winter	6.50±0.14Aa	8.69±0.20Ab	6.55±0.13Aa	9.47±0.15Ac	10.08±0.13Ad	9.61±0.10Ac
20~30	春 Spring	6.20±0.10Ba	8.47±0.14Bb	6.41±0.15Ba	8.50±0.14Bb	9.23±0.10Bc	9.45±0.24Bc
	夏 Summer	10.29±0.20Ca	14.24±0.16Dc	11.96±0.18Db	14.49±0.10Dc	15.23±0.14Dd	14.57±0.08Dc
	秋 Autumn	6.54±0.18Ba	10.29±0.09Cc	8.56±0.17Cb	10.17±0.11Cc	12.12±0.15Cd	12.82±0.14Ce
	冬 Winter	5.10±0.12Ab	6.24±0.16Ac	4.48±0.13Aa	6.33±0.10Acd	6.64±0.05Ad	6.32±0.13Acd
30~40	春 Spring	4.25±0.05Ba	5.35±0.57Bab	4.94±0.31Bab	5.47±0.23Bac	7.27±0.11Bb	6.48±0.13Bbc
	夏 Summer	6.34±0.11Da	9.49±0.73Cabc	8.96±0.29Cb	12.00±0.11Dc	12.40±0.09Cc	11.90±0.07Dc
	秋 Autumn	4.92±0.15Ca	6.10±0.36Bb	5.69±0.36Bb	7.06±0.08Cc	7.36±0.17Bc	7.60±0.11Cc
	冬 Winter	3.42±0.13Aa	3.33±0.08Aa	3.35±0.17Aa	4.27±0.16Ab	4.57±0.16Ab	5.25±0.05Ac

表 7 不同林龄桉树人工林土壤过氧化氢酶活性的变化

Table 7 Changes of soil catalase activity in *Eucalyptus* plantations at different forest ages

$(0.1\ mol\ L^{-1}\ KMnO_4\ mL\ g^{-1}\ 24\ h,\ mL\ g^{-1})$

土层 Soil layer (cm)	季节 Season	林龄 Stand age (a)					
		1	2	3	4	5	CK（10）
0~10	春 Spring	8.61±0.19Bb	6.63±0.05Aa	10.69±0.37Bbc	11.28±0.59ABabc	12.35±0.22Bc	12.14±0.17Bc
	夏 Summer	11.87±0.32Ca	11.07±0.49Ca	15.88±0.08Cb	16.99±0.08Cc	18.21±0.12Dd	17.17±0.20Dc
	秋 Autumn	10.20±0.04Cb	8.24±0.06Ba	13.32±0.06Bc	14.40±0.04Bd	16.11±0.08Ce	14.48±0.13Cd
	冬 Winter	7.26±0.06Ab	5.83±0.12Aa	8.45±0.17Ac	9.40±0.09Ad	10.41±0.09Ae	9.63±0.11Ad
10~20	春 Spring	6.13±0.04Bb	4.28±0.09Ba	7.15±0.10Bc	7.23±0.11Bc	9.28±0.08Bd	9.45±0.12Bd
	夏 Summer	8.35±0.12Db	6.27±0.09Da	12.54±0.56Cbcd	13.18±0.54Ccd	15.12±0.12Dd	14.07±0.15Dc
	秋 Autumn	7.21±0.02Cb	5.40±0.09Ca	9.95±0.07Cc	10.22±0.14Cd	12.04±0.11Cf	11.25±0.04Ce
	冬 Winter	5.28±0.08Ab	3.54±0.17Aa	6.24±0.12Ac	6.24±0.05Ac	7.12±0.08Ad	6.60±0.22Ac
20~30	春 Spring	4.15±0.07Bb	3.04±0.06Ba	5.37±0.07Bc	6.39±0.10Bd	7.62±0.21Bf	7.02±0.07Be
	夏 Summer	6.12±0.07Db	4.51±0.11Ca	9.23±0.05Dc	10.40±0.08Dd	13.13±0.06Df	10.98±0.05De
	秋 Autumn	4.69±0.18Cb	3.11±0.08Ba	7.25±0.06Cc	7.63±0.16Cd	8.60±0.07Cf	8.15±0.08Ce
	冬 Winter	3.46±0.16Ab	2.28±0.10Aa	4.68±0.19Ac	5.19±0.11Ad	6.27±0.08Ae	5.11±0.08Ad
30~40	春 Spring	2.38±0.14Aa	2.41±0.10ABa	4.34±0.13Bb	4.40±0.06Bb	5.12±0.08Bc	4.43±0.13Ab
	夏 Summer	4.65±0.05Bb	3.52±0.13Ca	6.54±0.26Dc	6.67±0.25Dc	8.49±0.16De	7.41±0.07Cd
	秋 Autumn	2.90±0.29ABa	2.66±0.23Ba	5.28±0.08Cb	5.40±0.08Cbc	5.87±0.08Cc	5.27±0.15Bb
	冬 Winter	2.18±0.05Aa	1.97±0.07Aa	3.22±0.02Ab	3.56±0.19Ac	4.25±0.11Ad	4.13±0.08Ad

3.3不同林龄桉树人工林土壤微生物与酶活性之间的相关性

细菌、放线菌、真菌、蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶之间均存在极著正相关关系（P<0.01）（表8）。细菌与放线菌之间的相关系数达到0.794，过氧化氢酶与蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶之间的相关系数分别达到0.887、0.817、0.904。说明土壤主要的三种微生物与四种酶活性之间关系密切，它们共同影响着土壤的质量。季节、土层和林龄及其交互作用对桉树土壤微生物类群（细菌、真菌和放线菌）和土壤

酶活性有显著的影响（P<0.05）（表9）。

表 8 土壤微生物与酶活性之间的相关性

Table 8 Correlation coefficient between soil microbes and enzyme activities

项目 Item	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungi	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
细菌 Bacteria	0.794**	0.456**	0.562**	0.452**	0.660**	0.600**
放线菌 Actinomycetes	1	0.508**	0.614**	0.493**	0.673**	0.543**
真菌 Fungi		1	0.592**	0.681**	0.592**	0.524**
蔗糖酶 Invertase			1	0.845**	0.868**	0.887**
脲酶 Urease				1	0.785**	0.817**
酸性磷酸酶 Acid phosphatase					1	0.904**

注：* 和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上达显著水平。

Note: Correlation coefficient labeled by * and** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 respectively.

表 9 季节、土层、林级对不同微生物类群和酶活性的影响

Table 9 Effects of seasons, soil layers and forest grades on different microbial groups and enzyme activities

项目 Item		季节 Season	土层 Soil layer	林级 Stand age	季节×土层 Season× Soil layer	季节×林级 Season× Stand age	土层×林级 Soil layer× Stand age	季节×土层×林级 Season×Soil layer ×Stand age
细菌 Bacteria	*df*	3	3	5	9	15	15	45
	F	1 563.110	11 293.256	453.793	54.531	412.249	59.483	15.006
	P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
放线菌 Actinomycetes	*df*	3	3	5	9	15	15	45
	F	3 031.583	3 685.875	565.515	93.833	27.900	58.106	6.672
	P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
真菌 Fungi	*df*	3	3	5	9	15	15	45
	F	1 235.271	1 439.256	733.021	65.865	127.745	20.423	12.612
	P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
蔗糖酶 Invertase	*df*	3	3	5	9	15	15	45
	F	6 144.956	7 569.319	4 371.733	91.098	66.677	60.089	3.796
	P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
脲酶 Urease	*df*	3	3	5	9	15	15	45
	F	2 802.279	5 887.828	6 283.733	130.049	136.405	269.999	7.601
	P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	*df*	3	3	5	9	15	15	45
	F	6 990.480	9 840.648	1 124.807	207.490	37.028	34.441	7.119
	P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
过氧化氢酶 Catalase	*df*	3	3	5	9	15	15	45
	F	3 902.033	7 998.509	2 323.238	117.007	66.418	40.788	6.139
	P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

4 讨论

4.1 土壤微生物数量的变化

林地生态系统中气候条件、植被类型、林分组成和土壤有机碳含量等因素都影响土壤微生物数量的变化（罗艺霖等，2013）。该研究表明，桂北桉树人工林土壤三大类土壤微生物中细菌最多，放线菌次之，真菌含量最少，这与谢龙莲（2005）和陈俊蓉等（2008）的研究结果相同，而季佳璨（2015）研究结果却

显示真菌含量比放线菌含量多，其不同的土壤pH可能是影响因素之一。南方亚热带季风气候，高温高湿的环境有利于植被凋落物的分解，可为微生物的生长环境提供便利的条件，而不同植被、不同林型能够形成不同生态条件，这为土壤微生物生长提供了不同食物来源和生存条件，间接导致微生物数量的差异性。

桉树人工林土壤细菌、放线菌、真菌的数量在土层上表现出明显的垂直分布规律，随着土层的加深逐渐减少，这与众多学者的研究结果相同（谢龙莲，2005；季佳璨，2015），各林龄、各季节的不同土层之间表现出显著差异。由于桉树属于浅根系植物，它的营养大部分来源于凋落物，且凋落物多聚集于土壤的表层，根系分泌物的作用也会促进土壤表层微生物的活性。Myers et al.（2001）研究发现，土壤温湿度、降雨量、土壤理化性质和树种特性等因素是某一特定林地生态系统土壤微生物数量季节变化的主要调控因子。王国兵等（2008）研究发现，受多种生态因子综合作用的影响，林地生态系统中土壤微生物具有明显的季节性波动。该研究中桉树人工林的细菌和放线菌数量的季节变化规律为秋季>夏季>春季>冬季，与谢龙莲（2005）的研结果相似，秋季含量较高，春冬季节含量较少，这主要是由于秋季凋落物较多，土温适宜，有利于微生物的分解；真菌的变化规律为春季>夏季>秋季>冬季。土壤微生物数量的分布受植被类型、林分组成以及土壤理化性质的影响，其中与林龄的关系尤为密切。

4.2 土壤酶活性的变化

该研究中，桉树人工林土壤蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性在土层中的变化规律与微生物数量的变化规律一致，这与许多人的研究结果相同（刘红英；2013；季佳璨，2015；黄恒泽，2017）。说明微生物数量对桉树不同林龄的变化较为敏感，微生物的微小变化都会直接影响酶活性的变化，这也同时反映了微生物和土壤酶活性之间存在密切联系。牛小云等（2015）对辽东山区日本落叶松人工纯林的研究表明，随着林分发育，土壤地力呈现衰退趋势；土壤微生物数量、酶活性及土壤养分含量在春季和秋季高于夏季；何斌等（2015）的研究结果表明，桂西北秃杉人工林随着林龄的增长，土壤养分和酶活性指标都有所升高，土壤肥力状况得到改善；也有研究表明脲酶、碱性磷酸酶活性随季节的变化为先增加后降低再增加再降低，蔗糖酶活性随季节的变化表现为先升高后下降的趋势（景宇鹏等，2013），土壤酶活性在夏季和秋季较高（万忠梅和宋长春，2009）。该研究中，蔗糖酶活性的季节变化规律为秋季>夏季>春季>冬季，脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶的变化规律为夏季>秋季>春季>冬季，马尾松林的变化规律与桉树人工林的变化规律相同。与我们研究结果不同的是，胡凯和王微（2015）研究表明，磷酸酶，多酚氧化酶和过氧化氢酶酶活均随桉树种植年限的增加呈显著的下降趋势，3～5 a生桉树人工林土壤酶活性之间差异不大，但均显著低于1 a桉树人工林，1 a生桉树人工林根际土壤中细菌和真菌数量明显高于对照农耕地，随种植年限的增加呈明显的下降趋势。我们研究结果与刘红英等（2013）的研究结果也不同，其认为由于夏秋温度高，该地区降雨多，土壤微生物数量多、活性大，有利于促进土壤的呼吸作用，有利于酶活性的增大。究其原因，这主要可能与研究地域、林分类型、立地、干扰措施及环境等不同有关，例如，胡凯和王微（2015）研究区的桉树林是农耕地改种而来，刘红英等（2013）主要针对不同栽植代数的桉树人工林为研究对象，并辅以灌草坡进行对比。有研究表明，植被群落和季节变化也是影响土壤酶活性的重要因素（罗蓉等，2018）。

该研究中对照组马尾松林的酶活性整体大于桉树人工林，土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶活性随桉树林龄的增大而趋于增加，脲酶与过氧化氢酶随林龄先减小或增大。桉树林为速生树种且轮伐期短，桉树采伐时带走了质量分数为80%的养分量（廖观荣等，2003）；周玉娟等（2009）的研究表明马尾松林的脲酶活性要比桉树人工林高；谭宏伟等（2014）研究发现按树林土壤蛋白酶和磷酸酶活性显著低于马尾松林和天然次生林；张凯（2015）研究发现马尾松林变为桉树人工林后，土壤酶活性显著下降。桂北低山丘陵地区，相对于马尾松林较长的轮伐期，桉树人工林林采取较短的轮伐期，可能造成大量的养分输出，从而引起土壤养分、微生物及酶活性的降低。因此，建议采取合理的营林管理措施，减少种植期和轮伐期间的高强度整地，以避免破坏桉树林下的凋（枯）落物积累层，适当施用有机肥和延长轮伐周期等均有利于桉树人工林生态系统土壤质量的提高。

5 结论

（1）桉树林土壤的三大类群微生物数量特征表现为细菌最多，真菌数量最少。土壤微生物数量和酶活性表现出一定的垂直分布规律，随土层的加深，微生物数量减小、酶活性降低。

（2）微生物和酶表现出季节差异性，不同的微生物和酶季节变化规律不同。不同土层土壤微生物和酶活性的季节响应特征差异较大，但均在冬季最低，主要与气温、水分条件、凋落物养分的归还等影响有关。

（3）不同林龄对土壤微生物数量和土壤酶活性有重要影响，土壤微生物数量与酶活性之间有极显著的相关性，两者相互作用，共同指示了桉树人工林土壤肥力的变化趋势。

致 谢：感谢程桂霞，刘建春，蒋玉龙，李翠玲等在实验样品分析方面提供的帮助，特此谢意!

参考文献：

ARNOLD RJ, XIE YJ, MIDGLEY SJ, et al., 2013. Emergence and rise of *Eucalypt* veneer production in China[J]. Int For Rev, 15(1): 33-47.

CHEN JR, HONG W, WU CZ, et al., 2008. Comparison of microbial amount of different *Eucalyptus* species[J]. Subtrop Agric Res, 4(2): 146-150. [陈俊蓉，洪伟，吴承祯，等，2008. 不同桉树土壤微生物数量的比较[J]. 亚热带农业研究，4(2)：146-150.]

DUAN CY, XU GP, SHEN YY, et al., 2018. Ecological stoichiometry characteristics of soils in *Eucalyptus* plantations with different ages in North Guangxi[J].For. resour. Manage,,(6): 117-124. [段春燕，徐广平，沈育伊，等，2018. 桂北不同林龄桉树人工林土壤生态化学计量特征[J]. 林业资源管理，(6)：117-124.]

GUAN SY, 1986. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agriculture Press. [关松荫，1986. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京：农业出版社.]

HE B, LU WP, TANG GW, et al., 2015. Soil Fertility change in *Taiwania flousiana* plantation in Northwest Guangxi[J]. For Res, 28(1): 88-92. [何斌，卢万鹏，唐光卫，等，2015. 桂西北秃杉人工林土壤肥力变化的研究[J]. 林业科学研究，28(1)：88-92.]

HUANG GQ, ZHAO QG, 2014. The history, statusquo, ecological problems and countermeasures of *Eucalyptus* plantations in Guangxi[J]. Acta Ecol Sin, 34(18): 5142-5152. [黄国勤，赵其国，2014. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J]. 生态学报，34(18)：5142-5152.]

HUANG HZ, 2017. Study on soil physical and chemical properties and enzyme activities of different species plantation in southwest Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University. [黄恒泽，2017. 桂西北不同树种人工林土壤理化性质和酶活性的研究[D]. 南宁：广西大学.]

HU K, WANG W. 2015. Microbial activity of rhizosphere soil of *Eucalyptus* plantation with different planting years.[J].Guizhou agr sci，43(12):105-109.[胡凯，王微，2015. 不同种植年限桉树人工林根际土壤微生物的活性[J]. 贵州农业科学，43(12)：105-109.]

JI JC, 2015. Three kinds of tree species in Jiangxi rare earth tailings soil nutrient and microorganism and enzyme activity[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University. [季佳璨，2015. 三种树种对赣南稀土尾矿土壤养分及微生物和酶活性的影响[D]. 南昌：江西农业大学.]

JING YP, LI YJ, NIAN JL, et al., 2013. Enzymatic sctivity of different salt affected soils in Tumochuan plain[J]. Ecol Environ Sci, 22(9): 1538-1543. [景宇鹏，李跃进，年佳乐，等，2013. 土默川平原不同盐渍化土壤酶活性特征的研究[J]. 生态环境学报，22(9)：1538-1543.]

LI C, 2015. Envisage ecological challenges of *Eucalyptus* plantations[J]. Eucalypt Sci Technol, 32(4): 46-50. [李超，2015. 正视桉树人工林生态问题[J]. 桉树科技，32(4)：46-50.]

LI C, WU ZH, SHANG XH, 2017. Research progress on soil microbial diversity of *Eucalyptus* plantations[J]. Eucalypt Sci Technol, 34(3): 51-54. [李超，吴志华，尚秀华，2017. 桉树人工林土壤微生物多样性研究技术进展[J]. 桉树科技，34(3)：51-54.]

LIANG J, REYNOLDS T, WASSIE A, et al., 2016. Effects of exotic *Eucalyptus* spp. plantations on soil properties in and around sacred natural sites in the northern Ethiopian Highlands[J]. Aims Agric Food, 1(2): 175-193.

LIAO GR, ZHONG JH, LI SY, et al., 2003. The nutrient cycling and balance of eucalyptus plantation ecosystemII. The nutrient cycling of eucalyptus plantation ecosystem[J]. Ecol Environ, (3): 296-299. [廖观荣，钟继洪，李淑仪，等，2003. 桉树人工林生态系统养分循环和平衡研究 II[J]. 桉树人工林生态系统的养分循环[J]. 生态环境，(3)：296-299.]

LIU H, Li JH, 2010. The study of the ecological problems of eucalyptus plantation and sustainable development in Maoming Xiaoliang[J]. J Sustain Dev, 3(1): 197.

LIU HY, 2013. The relationship of soil enzyme activities between soil nutrients in a long-term continuous planting *Eucalyptus* plantation[D]. Nanning: Guangxi University. [刘红英，2013. 连栽桉树人工林土壤酶活性及其与土壤养分的关系[D]. 南宁：广西大学.]

LUO R, YANG M, YU X, et al., 2018. Seasonal dynamics of soil microbial community and enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* plantation[J]. Chin J App Ecol, 29(4): 1163-1169. [罗蓉，杨苗，余旋，等，2018. 沙棘人工林土壤微生物群落结构及酶活性的季节变化[J]. 应用生态学报，29(4)：1163-1169.]

LUO YL, LI XW, ZHANG LH, 2013. Advances in reasearches on effect of environmental factors on soil microbes[J]. J Sichuan For Sci Technol, 34(5):19-24. [罗艺霖，李贤伟，张良辉，2013. 环境因子对林地土壤微生物影响的研究进展[J]. 四川林业科技，34(5)：19-24.]

MYERS RT, ZAK DR, WHITE DC, et al., 2001. Landscape-level patterns of microbial community composition and substrate use in upland forest ecosystems[J]. Soil Sci Soc Amer J, 65(2): 359-367.

NIU XY, SUN XM, CHEN DS, et al., 2015. Soil microorganisms, nutrients and enzyme activity of *Larix kaempferi* plantation under different ages in mountainous region of eastern Liaoning province, China[J]. Chin J App Ecol, 26(9): 2663-2672. [牛小云，孙晓梅，陈东升，等，2015. 辽东山区不同林龄日本落叶松人工林土壤微生物、养分及酶活性[J]. 应用生态学报，26(9)：2663-2672.]

SONG XC, XIANG DY, YANG ZN, et al., 2017. Microbial functional diversity of rhizosphere soil of *Eucalyptus* plantation in Guangxi[J]. J Centr S Univ For Technol, 37(1): 58-61.[宋贤冲，项东云，杨中宁，等，2017. 广西桉树人工林根际土壤微生物群落功能多样性[J]. 中南林业科技大学学报，37(1)：58-61.]

TAN HW, YANG SD, WU J, et al., 2014. Comparison of *Eucalyptus* plantation with and other forests in soil microbial activity and bacterial diversity in red soil region, China[J]. Acta Pedol Sin, 51(3): 575-584. [谭宏伟，杨尚东，吴俊，等，2014. 红壤区按树人工林与不同林分土壤微生物活性及细菌多样性的比较[J]. 土壤学报，51(3)：575-584.]

WAN ZM, SONG CC, 2009. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment[J]. Chin J Soil Sci, 40(4): 951-956. [万忠梅，宋长春，2009. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. 土壤通报，40(4)：951-956.]

WANG GB, RUAN HH, TANG YF, et al., 2008. Seasonal fluctuation of soil microbial biomass carbon in secondary oak forest and *Pinus taeda* plantation in north subtropical area of China[J]. Chin J App Ecol, 19(1): 37-42. [王国兵，阮宏华，唐燕飞，等，2008. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态[J]. 应用生态学报，19(1)：37-42.]

WEI JH, HOU M, WEI TL, et al., 2017. Comparison on *Eucalyptus* spp. plantation growth and soil physicochemical properties in different slope position[J]. J Anhui Agric, 45(5): 167-169. [韦建宏，侯敏，韦添露，等，2017. 不同坡位桉树人工林生长和土壤理化性质比较[J]. 安徽农业科学，45(5)：167-169.]

WEN YG, LIU SR, CHEN F, 2005. The ecological problems and sustainable management of *Eucalyptus* industrial plantation[J]. J Guangxi Acad Sci, 21(1): 13-18. [温远光，刘世荣，陈放，2005. 桉树工业人工林的生态问题与可持续经营[J]. 广西科学院学报，21(1)：13-18.]

XIE LL, 2005. Studies on the dynamics of soil microorganisms in a eucalyputs plantation[D]. Haikou: Hainan University. [谢龙莲，2005. 桉树人工林土壤微生物动态变化研究[D]. 海口：华南热带农业大学.]

XU GH, ZHEN HY, 1986. Handbook of analytical methods for soil microbiology[M]. Beijing: Agriculture Press: 102-110. [许光辉，郑洪元，1986. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京：农业出版社：102-110.]

XU GP, GU DX, PAN FJ, et al., 2014. Effects of different land-use types on soil enzyme activity in Karst mountain areas of Southwest Guangxi[J]. Guihaia, 34(4): 460-466. [徐广平，顾大形，潘复静，等，2014. 不同土地利用方式对桂西南岩溶山地土壤酶活性的影响[J]. 广西植物，34(4)：460-466.]

YANG YB, LÜ CQ, HUANG BL, et al., 2008. Soil microbes and enzymes in *Eucalyptus* plantations under different rotations of continuously planting[J]. J NE For Univ, 36(12): 10-12. [杨远彪，吕成群，黄宝灵，等，

2008. 连栽桉树人工林土壤微生物和酶活性的分析[J]. 东北林业大学学报，36(12)：10-12.]

ZENG XL, 2009. The research progress for soil enzyme properties of *Eucalyptus* forest[J]. J Guangdong Educ Inst, 29(5): 97-103. [曾小龙，2009. 桉树林地土壤酶特性研究进展[J]. 广东教育学院学报，29(5): 97-103.]

ZHANG JJ, WEI XJ, FU F, et al., 2012. Investigation and economic benefit evaluation of fast-growing and high-yield forest of *Eucalyptus* in Guangxi[J]. Green China, 9:34-37. [张健军，韦晓娟，傅锋，等，2012. 广西桉树速生丰产林调查与经济效益评价[J]. 绿色中国，9：34-37.]

ZHANG K, ZHENG H, CHEN FL, et al., 2015. Impacts of replacement of pinus with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities[J]. Acta Pedol Sin, 52(3): 646-653. [张凯，郑华，陈法霖，等，2015. 桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响[J]. 土壤学报，52(3)：646-653.]

ZHOU LW, HUANG YQ, WANG XG, et al., 2017. Dynamic changes of soil microbe quantity in reed vegetation of Huixian Karst Wetland, Guilin, China. [J]. Guihaia, 37(6): 685-693. [周龙武，黄玉清，王新桂，等，2017. 桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤微生物数量动态分析[J]. 广西植物，37(6)：685-693.]

ZHU LX, 2018. Effects of different management practices on soil carbon and nitrogen and related microbial processes in rain-fed farmlands[D]. Yanglin: Northwest A & F University. [朱利霞，2018. 不同调控措施对旱作农田土壤碳氮及微生物学特性的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学.]

ZHOU YJ, FENG M, LI RW, et al., 2009. Variance analysis of soil enzyme activities between *Eucalyptus* plantation and other forestlands[J]. Guangxi For Sci, 38(3): 155-157. [周玉娟，冯旎，李日伟，等，2009. 桉树人工林与其它林地土壤酶活性的差异分析[J]. 广西林业科学，38(3)：155-157.]